

CARACTERIZACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN EL CONTEXTO DE LA CIUDAD DE PEREIRA

Vanesa Londoño Marín

CARACTERIZACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN EL CONTEXTO DE LA CIUDAD DE PEREIRA

Vanesa Londoño Marín

Trabajo de grado presentado como
requisito parcial para optar al título
Ingeniero Electricista

Pereira, agosto de 2018
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
Programa de Ingeniería Eléctrica



CARACTERIZACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN EL CONTEXTO DE LA CIUDAD DE PEREIRA

Vanesa Londoño Marín

Director: Alejandro Garcés Ruiz

Pereira agosto de 2018
Programa de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira

Agradecimientos

Al Ing. Alejandro Garcés por la orientación brindada y su colaboración durante todo el proceso
A la Ing. Yensy Helena Gómez Villegas por la guía continua y el tiempo dedicado
A la empresa de energía de Pereira por su apoyo en el desarrollo del proyecto
A mi familia por su apoyo durante el proceso de mi formación profesional
A mis amigos por sus aportes realizados

Resumen

Este trabajo presenta la simulación de un modelo dinámico que permite evaluar el comportamiento de la batería de un vehículo eléctrico Nissan LEAF en una topografía como la de la ciudad de Pereira. Este análisis se hace a partir de datos como la masa e inercia de los componentes del vehículo eléctrico en función de la topología del terreno y velocidad promedio brindada por las APIs, de Google Maps. Los resultados obtenidos en esta investigación serán usados como futuros estudios para inferir la demanda del sistema eléctrico de la ciudad de Pereira ante diferentes escenarios de penetración de los vehículos eléctricos.

Notación básica

- (VE). Vehículo Eléctrico.
- (VHE). Vehículo Híbrido Eléctrico.
- (TIS). Sistemas de Transporte Inteligente.
- (REI). Redes Eléctricas Inteligentes.
- (V2G). Del vehículo a la red.
- R_g . Radio de engranaje de transmisión.
- F_d . Es la propulsión que impulsa al VE.
- F_{gxt} . Se conoce como la fuerza gravitacional.
- F_{roll} . Resistencia a la rodadura es la fricción entre la superficie y los neumáticos.
- F_{ad} . Resistencia aerodinámica.
- m . Es la masa total del vehículo.
- a . Es la aceleración natural.
- g . Aceleración gravitacional.
- C_o . Es el coeficiente de rodadura.
- V . Velocidad lineal.
- ρ . Es la densidad del aire.
- C_d . Es el coeficiente de resistencia aerodinámica.
- A_F . Es el área frontal del vehículo.
- V_o . Es la velocidad del viento.
- J_{wh} . Es la inercia de la rueda.
- $\frac{dv}{dt}$. La aceleración natural del vehículo.

Índice general

1. Introducción	2
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Justificación	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Estado del arte.....	4
1.5 Estructura del trabajo.....	6
2. Marco conceptual	7
2.1 Revisión del estado del arte de los vehículos eléctricos	7
2.2 Modelo dinámico del vehículo.....	11
2.3 Modelo de la batería	12
2.4 Interacción entre el modelo del vehículo y el modelo de la batería	13
3. Implementación y validación de resultados	15
3.1 Aplicación del modelo dinámico.....	15
3.2 Implementación del modelo	17
3.3 Resultados.....	18
3.4 Uso del modelo.....	20
4. Conclusiones	22
5. Bibliografía	23

Capítulo 1

Introducción

1.1 Planteamiento del problema

El interés por los VEs ha crecido en los últimos años, como una solución a las emisiones de CO₂ y a la dependencia de los combustibles fósiles. Estudios realizados por la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética) en el 2009, muestran cómo el sector de transporte consume el 91.9% [1] de combustible fósil en Colombia, lo que aumenta la demanda y la inflación de los precios. Adicionalmente, la movilidad eléctrica permite crear desarrollo económico, reduciendo los precios de transporte y generando oportunidades en la industria tecnológica [2]. En Colombia la introducción de los VEs ha sido lenta, por el alto costo de los fabricantes. Estos costos están directamente relacionados con las baterías [3][4]. Las cuales, tienen una vida útil limitada, que hace que su uso esté sujeto a restricciones de temperatura, número de ciclos de carga y descarga, comportamiento del conductor, peso del vehículo, velocidad y condiciones del tráfico.

Existen varios modelos de VEs como de baterías en la literatura. Los modelos de baterías de plomo ácido, nickel metal hydride (NiMH) y ion litio (Li-ion) entre otros se categorizan desde modelos electroquímicos, eléctricos y matemáticos [5]. Sin embargo, estos modelos no son suficientes para determinar la autonomía de la batería, especialmente en algunas ciudades de Colombia que se encuentran sobre la región andina. En estas ciudades el consumo de la batería puede verse afectado por el perfil del terreno (Topografía) y la dirección del recorrido del VE, ya que las velocidades típicas de las vías pueden interferir en el estado de carga y descarga, especialmente si el vehículo no cuenta con frenado regenerativo. Los modelos dinámicos del VE tienen como objetivo describir como un vehículo se mueve en una superficie bajo la influencia de fuerzas entre la carretera y las llantas, así como la aerodinámica y la gravedad. Comprender la dinámica del vehículo permite evaluar el rendimiento de la batería tanto en carga como el consumo promedio de energía por distancia recorrida. Este tipo de análisis se puede hacer por medio de simulaciones utilizando ecuaciones simples basadas en leyes de Newton [6].

Para realizar estudios de impacto de los VEs en Colombia, se hace necesario implementar un modelo dinámico de VE para entender el comportamiento de la batería sobre terrenos montañosos. Herramientas como Google Maps cuentan con APIs que permiten consultar los

puntos de parada de un vehículo, la velocidad promedio, el origen y destino de una ruta, el perfil de elevación de la misma, además de la distancia y el tiempo del recorrido [7]. El modelo dinámico del VE puede utilizar los datos entregados por estas herramientas para simular el consumo de energía de la batería lo que permitiría estudiar a futuro la demanda eléctrica del sistema de transporte en diferentes zonas de las ciudades, por medio de las matrices origen destino [8] para así implementar estrategias V2G, que permiten optimizar la carga y descarga de las baterías.

1.2 Justificación

De acuerdo al plan de acción indicativo de eficiencia energética (2017-2022), el consumo energético de Colombia se concentra principalmente en los sectores de transporte (40.2%), industrial (28.9%) y residencial (6.5%) [9]. El que presenta una mayor demanda es el transporte debido a que la topología nacional presenta varios accidentes geográficos, generando así la mayor cantidad de las emisiones de CO₂ y otros contaminantes, ya que el ACPM y la gasolina motora son los energéticos con mayor relevancia en el sector, con una participación de 37% y 40% respectivamente; mientras que la electricidad cuenta con una participación de menos del 1% [9].

La preocupación que deja las altas tasas de contaminación, en su mayoría por el sector de transporte, ha generado necesidad de encontrar un medio de transporte que sea efectivo, barato y no contaminante. Los VEs están comenzando a ganar peso en la industria del automóvil, dada sus claras ventajas frente a los vehículos de combustible tradicionales en cuanto a ahorro en consumo y respeto al medio ambiente. Como evidencia de lo anterior, una moto se abastece con \$30.000 o \$40.000 de gasolina y una carga de energía vale entre \$10.000 y 12.000 pesos para el mismo recorrido [10]; adicionalmente el mantenimiento de los VEs son mucho menores que los vehículos convencionales.

Aunque la implementación de los VEs y VHEs no ha tenido tanto desarrollo como en otros países, tanto por cuestiones económicas como de avances tecnológicos y de infraestructura, en el marco del primer encuentro internacional de movilidad eléctrica organizado por el consejo mundial de energía, Colombia-COCME, se estableció que para el año 2030 entraran 400 mil vehículos eléctricos al país [11]. Por lo que es necesario hacer un estudio exhaustivo de cómo estos podrían beneficiar o afectar el sistema eléctrico del país. Específicamente en la ciudad de Pereira donde aún no existen tantos avances en pro de la implementación de los VEs y VHEs, haciendo necesaria la caracterización de estos en la ciudad, teniendo en cuenta las distancias que se esperan recorrer con sus respectivos tiempos y comparándolo con estudios y análisis de las fichas tecnomecánicas de VEs y VHEs que están en el mercado internacional

La empresa de energía de Pereira ha empezado a incursionar en los VEs, mediante la investigación y la proyección del desarrollo de electrolineras o estaciones de carga, donde se promueve una solución de movilidad limpia en la región, ayudando así a la complementación

de los pocos estudios del comportamiento de las baterías cuando son sometidas a terrenos topográficos como los de esta ciudad; para predecir estos comportamientos se requiere un modelo matemático simplificado que logre arrojar los datos necesarios del comportamiento; se requiere una base de datos sobre la eficiencia y la duración autónoma de las baterías de todos los VEs comerciales así como las velocidades promedio con la que transitan por la ruta escogida.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Caracterizar los VEs en el contexto de la ciudad de Pereira, haciendo énfasis en la investigación de la duración de las baterías, trayecto máximo que pueden recorrer de forma autónoma y los efectos sobre el sistema.

1.3.2 Objetivos específicos

- Recolectar información sobre los VEs ya existentes y clasificar la información para su análisis
- Desarrollar el modelo dinámico del VE
- Desarrollar un modelo matemático simplificado del funcionamiento de las baterías de los VEs
- Implementar los modelos matemáticos usando Python
- Analizar los resultados obtenidos en el contexto de la ciudad de Pereira.

1.4 Estado del arte

El problema de optimización de las baterías de los VEs y VHEs es un tema en el cual se está incursionado en la actualidad. El desarrollo de este se logra con un modelamiento de las baterías dependiendo de las distancias que van a ser recorridas, del peso de la batería y del funcionamiento del motor, así mismo la configuración del diseño o tamaño de las baterías ayuda a mejorar la estrategia de carga para lograr minimizar la función de costo. Un modelo no-lineal permite la carga inteligente de los VEs en sistemas eléctricos de distribución teniendo en cuenta los diferentes escenarios de recarga como la variación del precio de la energía según la hora en que se va a recargar, convirtiendo el modelo planteado más confiable y eficiente [12].

Por lo que cada uno de los parámetros del diseño del VE deben elegirse de forma rigurosa, para obtener la mejor configuración posible y un rendimiento dinámico competitivo a precios aceptables para el mercado de consumo, dado que los modelos detallados del sistema del

vehículo suelen contener una mezcla de datos empíricos, suposiciones de ingeniería y algoritmos basados en la física. El modelamiento y la simulación son la mejor opción para la creación y análisis de los VEs y VHEs, debido a que el tiempo empleado es muy poco comparado con el desgaste que causa el desarrollo de prototipos y pruebas de cada combinación de diseño, ayudando a diagnosticar las principales fallas del diseño dado que los modelos basados en la física facilitan las simulaciones dinámicas, arrojando un modelo resultante en función de los parámetros del vehículo, las constantes físicas y las variables [13].

Para lograr una correcta introducción de los VEs en el sistema de potencia, es de vital importancia estudiar la teoría existente de los temas de redes de distribución de energía eléctrica y su comportamiento con la carga y descarga de los VEs, analizando estadísticamente el impacto que causa incluir VEs en las redes de distribución y en la curva de demanda de potencia eléctrica en las horas pico. Las estrategias que se plantean ayudan a optimizar la implementación de los VEs mediante el desarrollo matemático sobre la base de datos de demandas residenciales y puntos de recarga de vehículos eléctricos [14].

Una de las estrategias que implementara la empresa de energía de Pereira es la construcción de una estación de servicio para VEs en busca de fomentar la utilización de estos [15]. La estación se abastecerá en parte con energía solar y directamente desde la red de distribución de energía eléctrica, creando alto beneficio para el medio ambiente y disminuyendo la combustión en las calles de los vehículos convencionales, debido a que producen una gran cantidad y necesitan de petróleo que es una materia prima que puede acabarse en cualquier momento.

El desarrollo de las tecnologías de los VEs ha permitido lanzar modelos capaces de cubrir casi es su totalidad las rutas que los consumidores requieren transitar en su rutina diaria y al mismo tiempo proteger al medio ambiente de las sustancias contaminantes que generan los carros convencionales. Sin embargo se debe tener en cuenta que la red de distribución debe adaptarse a una nueva demanda, puesto que para que ingrese un nuevo modelo de movilidad se debe tener la infraestructura necesaria, así como un avance significativo en las baterías de los VEs, logrando disminuir los costos y el tiempo de recarga, para que se pueda abastecer la demanda de energía y al mismo tiempo optimizar el sistema de generación eléctrica [16].

El principal desafío está en lograr baterías más eficientes, por lo que las baterías con frenado regenerativo son una gran alternativa en el momento de buscar mayor eficiencia en los recorridos que realiza el VE, debido a que almacena la energía que se pierde en forma de calor durante el frenado, pero al mismo tiempo está siendo sometido a niveles de exigencia muy altos, ya que se deben de contener cargas elevadas con la menor masa posible para evitar que la autonomía del vehículo se vea afectada. Por lo que es necesario analizar los elementos del sistema y la forma en que influyen directamente en la generación de energía [17].

1.5 Estructura del trabajo

El documento se encuentra organizado por capítulos donde se explica el modelo dinámico de la batería del VE, así como su simulación sobre la ruta de la ciudad de Pereira a Santa Rosa, utilizando los datos especificados en la Tabla 1 de un Nissan LEAF y los datos entregados por las APIS de Google Maps. Este documento se encuentra organizado de la siguiente manera: El capítulo 2 presenta un marco conceptual amplio del tema, donde se explica el modelo escogido de una forma clara y gráfica, además se puede entender con más claridad los modelos utilizados de las baterías de los VE ya que se presenta una revisión del estado de arte de estos; En el capítulo 3 se presenta la implementación del modelo dinámico de la batería con su respectivo análisis para encontrar las variables necesarias y los resultados obtenidos de las simulaciones con su debida interpretación. Finalmente, en el capítulo 4 se generan unas conclusiones sobre los capítulos anteriores y se deja abierto el estudio para futuros trabajos.

Capítulo 2

Marco conceptual

2.1 Revisión del estado del arte de los vehículos eléctricos

En la actualidad existen varias marcas de vehículos que han desarrollado VE, en Colombia la venta de VE y VHE es muy baja ya que solo hasta este año se han registrado 489 VE y 376 VHE [18]. A pesar de que en el año 2012 se reglamentaron algunos incentivos tributarios como la exclusión de IVA y deducción de renta líquida a vehículos que ayudaran al cuidado del medio ambiente y adicionalmente los VE eléctricos están exonerados de medidas de restricción vehicular - pico y placa - en las principales ciudades del país [14]. Se hace necesario crear mayores incentivos que promuevan la compra de estos vehículos que cada vez poseen mejores especificaciones como se muestran en las siguientes gráficas:

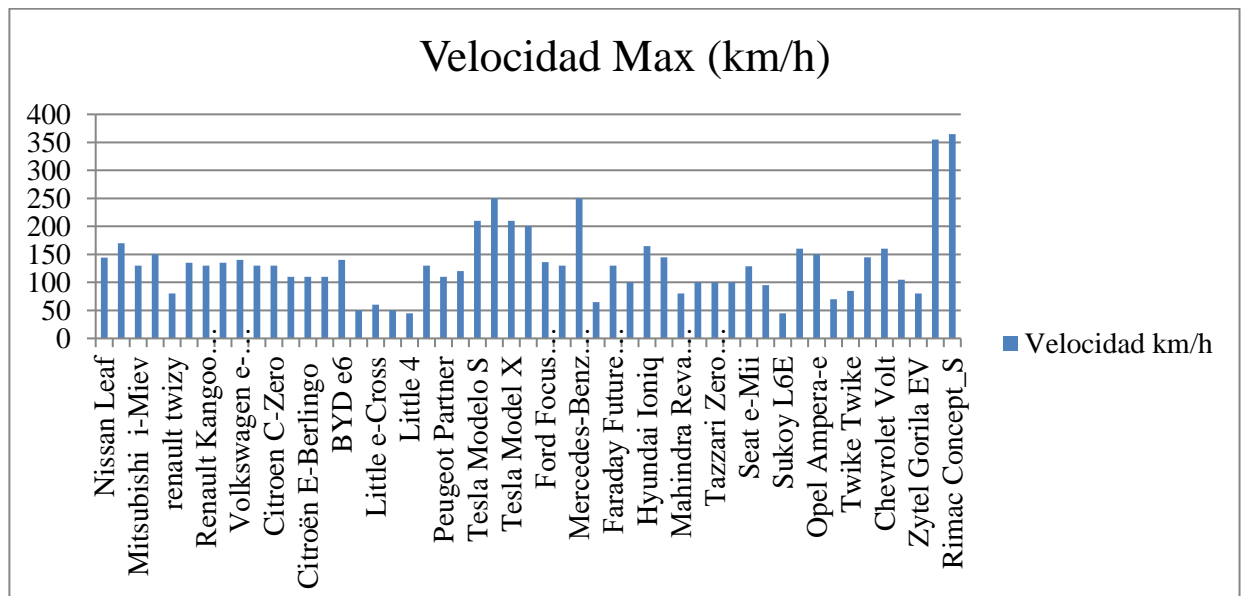


Gráfico 1. Velocidad Máxima (km/h)

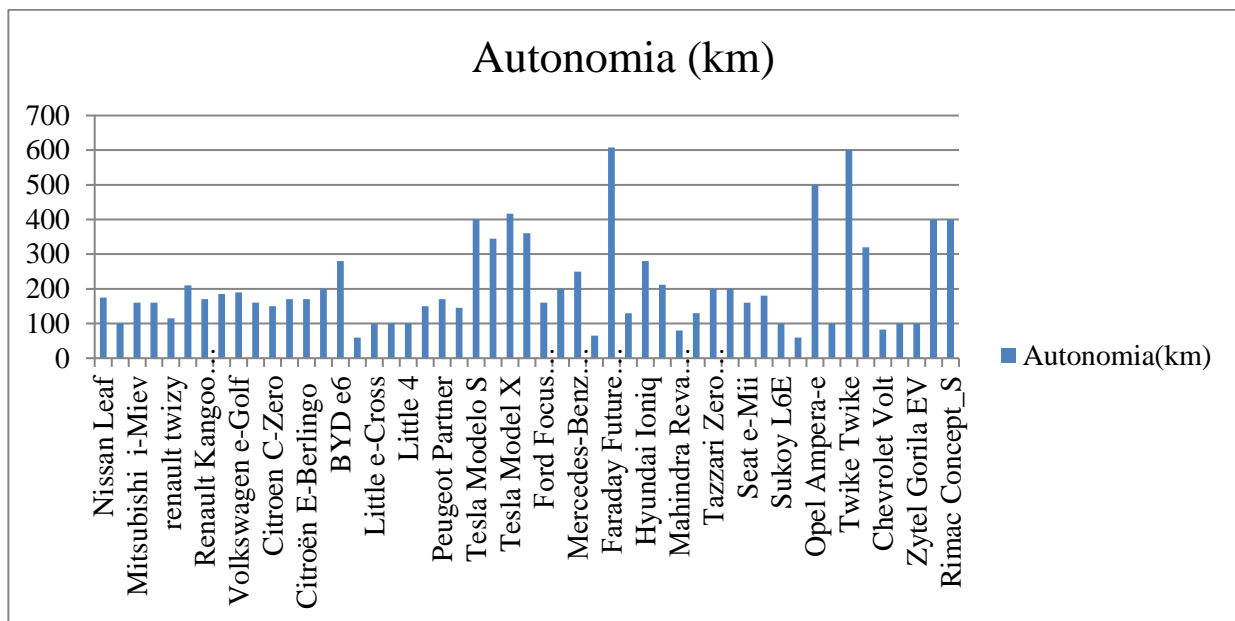


Gráfico 2. Autonomía de la batería (km)

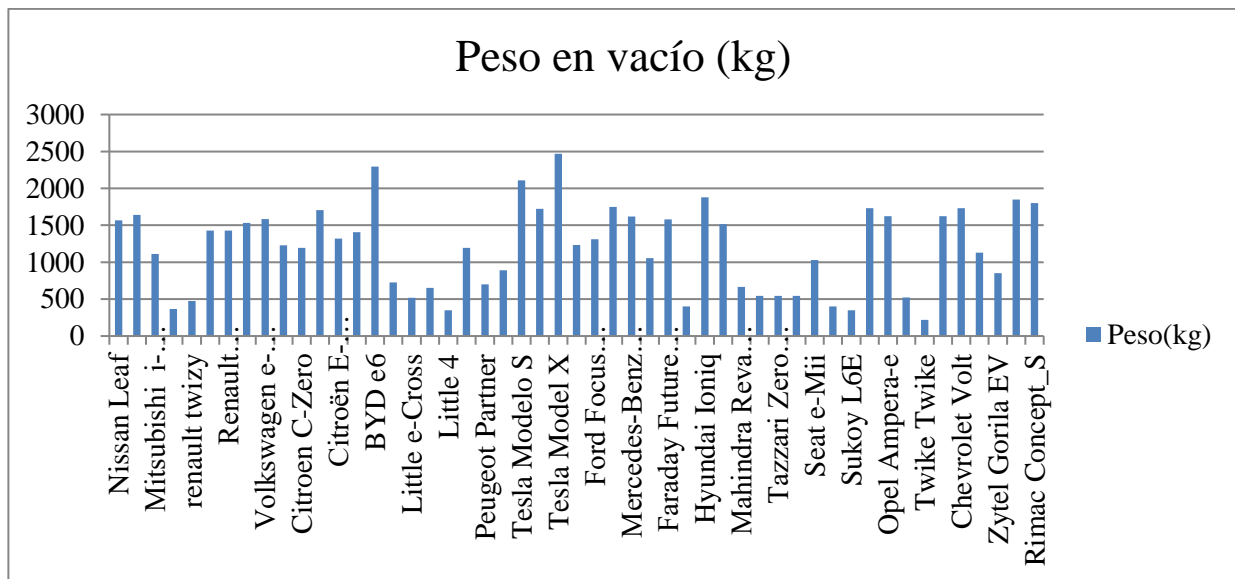


Gráfico 3. Peso en vacío (kg)

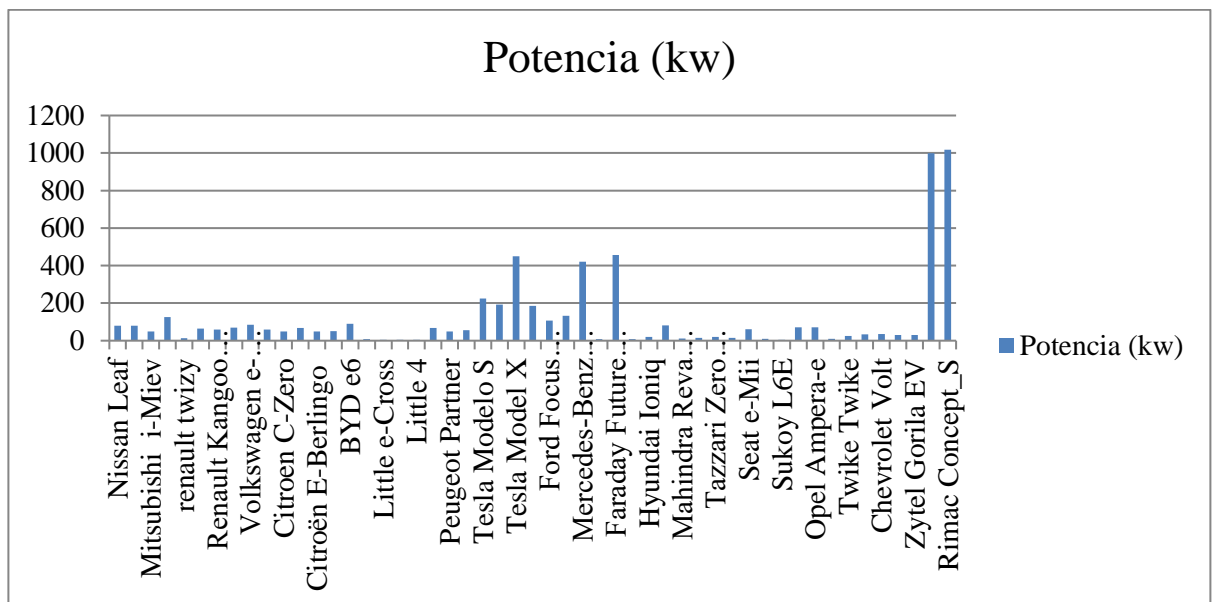


Gráfico 4. Potencia en (kw)

En las graficas se puede apreciar los diferentes valores de velocidad máxima, autonomía de la batería y peso en vacío que se recolectaron de los vehículos eléctricos elegidos. El vehículo que alcanza una mayor velocidad y potencia es el Rimac concept S ya que posee cuatro motores eléctricos, dos en el eje delantero que suman 500 kW y otros dos en el eje posterior de 600 kW, también posee una aerodinámica avanzada ya que es un vehículo de carreras [19]. El Faraday future FF91 posee una batería que permite la autonomía más alta de 608 km, gracias a sus increíbles especificaciones puede estar al mismo nivel del Rimac concept S, que ha sido concebido como un vehículo superdeportivo y no un vehículo de lujo para cuatro personas como es el Faraday future FF91 [20]. El vehículo con mayor peso es el Tesla modelo X puesto que es el primer vehículo del mundo preparado ante un ataque químico o biológico, por lo posee un gigantesco filtro de aire, hasta diez veces mayor al de cualquier otro vehículo moderno [21].

Por otra parte el avance de la tecnología ha permitido la construcción de VE con otras características, como es el caso de los VE con frenado regenerativo, donde se puede almacenar la energía que se pierde en forma de calor durante el frenado de los VE o VHEs y utilizarla en otro instante cuando el VE lo requiera [17], aumentando la energía disponible durante el trayecto y al mismo tiempo la autonomía del vehículo, ya que puede recorrer mayor kilometraje. La empresa de energía de Pereira cuenta con un Kangoo Z.E como el de la foto 1.



Foto 1. Vehículo Eléctrico con frenado regenerativo

Además desde 1945 se ha venido desarrollando investigaciones sobre para mejorar las baterías como una fuente de energía de los VEs [22]. Entre las baterías más comunes de VE se encuentra la batería de Plomo-ácido, baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd), baterías de Níquel-hidruro de metal (Ni-MH) y baterías de iones de litio.

- Plomo-ácido: esta batería ha sido utilizada ampliamente en la industria automotriz, está constituida por dos electrodos de plomo, los cuales tienen procesos invertidos en la carga y descarga. Cuando está descargado, se encuentra en forma de sulfato de plomo (II) (PbSO_4) incrustado en una matriz de plomo metálico en el elemento metálico (Pb)[16].
Una de sus mayores ventajas es el precio, su disponibilidad y fabricación. Aunque por otro lado su peso no le favorece ya que es excesivo, además es muy contaminante, su densidad de energía es baja, su vida útil es muy limitada y no permite carcas ni sobrecargas profundas[23].
- Níquel-cadmio (Ni-Cd): Estas baterías son de naturaleza endotérmica por lo que es posible cargarlas mucho más rápido y su vida útil es muy larga. Aunque tienen una densidad de energía baja, son muy susceptibles al efecto de memoria y la toxicidad del cadmio es un serio problema por lo que han sido prohibidas en la unión europea [16].
- Níquel-hidruro metálico (Ni-MH): Esta batería es similar a la de Níquel-cadmio, ya que utiliza un ánodo de oxihidróxido de níquel, pero el cátodo es de una aleación de hidruro metálico. El principal inconveniente de esta baterías, es que se autodescarga a un ritmo mayor que las otras baterías y también es sensible a sobrecargas [16].
- Iones de litio: Actualmente es la batería más utilizada en VE debido a su alta capacidad de densidad energética, poco mantenimiento y que no sufren efectos de

memoria. A pesar de todas sus ventajas el costo es uno de los principales obstáculos que enfrentan para su desarrollo [16].

2.2 Modelo dinámico del vehículo

El modelo de Wenzhong Gao [13] es uno de los más sencillos de implementar porque permite modelar la dinámica del VE basándose en la segunda ley de Newton [6]. Este modelo considera las fuerzas aplicadas sobre el vehículo y además la fuerza de torque que se genera en las ruedas.

$$T_{wh} = R_g \eta_{trans} T_{sh} \quad (1.1)$$

Donde R_g es el Radio de engranaje de transmisión y η_{trans} la eficiencia de transmisión. Este torque proporciona la fuerza motriz del vehículo.

$$F_d = \frac{T_{wh}}{r} \quad (1.2)$$

El modelo dinámico considera la siguiente ecuación [24], la cual corresponde al diagrama de cuerpo libre mostrado en la figura 1:

$$F_d = F_{gxt} + F_{roll} + F_{ad} + ma \quad (1.3)$$

$$F_d = mg \sin(\alpha) + mg C_o \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho C_d A_F (V + V_o)^2 + \left(m + \frac{I_{wh}}{r^2} \right) \frac{dv}{dt} \quad (1.4)$$

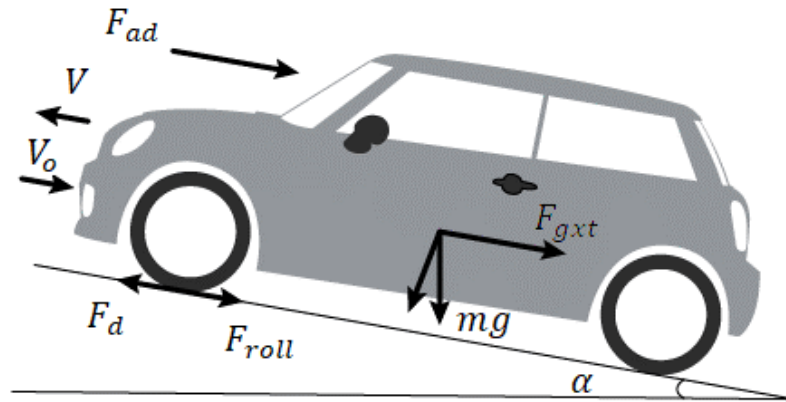


Figura 1. Modelo dinámico del VE

Donde la fuerza de la ecuación 1.3 F_d es la propulsión que impulsa al VE, la fuerza F_{gxt} se conoce como la fuerza gravitacional la cual contiene la componente del peso del vehículo a

lo largo una pendiente, F_{roll} resistencia a la rodadura es la fricción entre la superficie y los neumáticos, F_{ad} resistencia aerodinámica esta fuerza tiene en cuenta la fricción con el viento, m = masa total (masa del vehículo y masa de la carga), y a es la aceleración natural.

La ecuación 1.4 especifica cada una de las fuerzas que hacen parte del modelo dinámico. $F_{gxt} = mg \sin(\alpha)$, g = aceleración gravitacional y $\sin(\alpha)$ es la elevación de la superficie (ángulo de la pendiente). $F_{roll} = mgC_o \cos(\alpha)$, C_o es el coeficiente de rodadura, V velocidad en cada tramo de la ruta. $F_{ad} = \frac{1}{2}\rho C_d A_F (V + V_o)^2$, ρ es la densidad del aire, C_d es el coeficiente de resistencia aerodinámica, A_F es el área frontal del vehículo, V_o es la velocidad del viento la cual se asume como $V_o = 0$, y es V la velocidad lineal del vehículo. $ma = (m + J_{wh}/r^2)dv/dt$ donde J_{wh} es la inercia de la rueda, r^2 es el radio de la rueda y (dv/dt) la aceleración natural del vehículo.

2.3 Modelo de la batería

La búsqueda de modelos dinámicos de baterías como ion Lithium, NiMH y baterías de plomo ácido de los VE va desde aspectos electroquímicos, eléctricos y matemáticos [24][23]. Los modelos electroquímicos, tiene un alto consumo computacional ya que se compone de un sistema donde múltiples variables varían según el tiempo, por lo tanto se necesitan de ecuaciones diferenciales para su solución aproximada, además los modelos electroquímicos no son proporcionados por fabricantes y requieren una extensa investigación [24].

La complejidad y las limitaciones de los modelos electroquímicos llevó a los investigadores a crear un enfoque llamado Modelado de circuitos eléctricos. Hoy en día son usados en muchas aplicaciones [25][26] debido a su equilibrio entre la complejidad y precisión del modelo que proporciona resultados en tiempo real [27]. Estos modelos se construyen poniendo resistencias, condensadores, fuentes de voltajes formando un circuito como se ve en la figura 2.

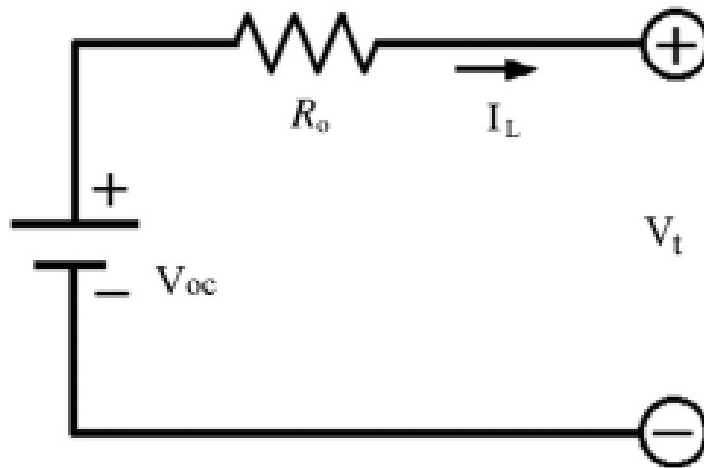


Figura 2. construcción de los modelos electroquímicos

Los modelos matemáticos [28][29][13] representan una solución sencilla ya que se pueden desarrollar de manera analítica o estocástica. Un modelo analítico puede aprovechar diferentes aspectos dinámicos del VE desde su peso, velocidad entre otras características para calcular diferentes aspectos y relacionarlos en una ecuación sencilla para describir las propiedades de la batería. Un ejemplo de un modelo analítico, puede referirse al Modelo de batería cinética (KiBaM) [30] donde se modela la carga total de la batería y parámetros de estado de carga. Los modelos estocásticos como los desarrollados por Chiasserini y Rao [31], son modelos mucho más precisos, pero utiliza variables aleatorias para calcular el estado actual de las baterías; al ser un sistema aleatorio convierte un poco el análisis en una modelo complejo el cual lleva a utilizar métodos como la cadena de Markov en tiempo discreto u otro método que pueda predecir el futuro.

Después identificar las los diferentes modelos de baterías se hace enfoque específicamente en el modelo analítico, ya que permite obtener resultados aproximados del fenómeno físico y además del aprovechamiento de datos disponibles para la configuración del VE (Tabla 1) donde parte o la totalidad de su energía es proporcionada por la batería.

2.4 Interacción entre el modelo del vehículo y el modelo de la batería

El modelo dinámico del vehículo puede ser empleado para estimar la carga y descarga de la batería partiendo de que se tiene una trayectoria donde el VE se va a movilizar de un punto a a un punto b , como se muestra en la figura 3, durante este trayecto el vehículo necesita de un propulsión para lograr llegar hasta su destino final, también se hace necesario emplear una batería que le brinde la energía necesaria de tal forma que todas las fuerzas que actúan sobre el vehículo (ver figura 1) no afecten su recorrido. Por lo que acceder al estado inicial y final de la batería ayudaría a estimar la eficiencia de la batería y a realizar una comparación con los datos del fabricante, puesto que el terreno recorrido y algunos de los parámetros de la ecuación 1.4 pueden variar.

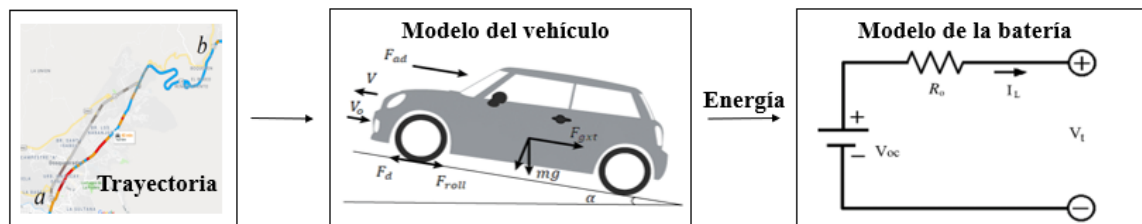


Figura 3. Interacción del modelo del VE y de la batería

Un aspecto clave en el momento de evaluar el modelo dinámico del VE es la topología y la velocidad, dado que entre mas pendiente sea el terreno que se recorre, la batería consumirá

más energía por las fuerzas mayores que influyen en el VE. Por el contrario si se tiene una topología poco montañosa, la eficiencia de la batería será mucho mayor al esperado cuando existe un ángulo de elevación casi constante y la velocidad no tendrá una variación tan grande como cuando se tienen terrenos poco elevados.

Lo anterior lleva a evaluar la curva de demanda que es afectada por los VE eléctrico, donde se puede decir que la energía consumida por este, siempre va a ser mayor en un ascenso que en un descenso, y que se necesitan de puntos estratégicos de carga para que el VE logre realizar el recorrido deseado y al mismo tiempo permita la operación de REI equilibrando la oferta y la demanda entre los generadores y los consumidores de la red [32].

Capítulo 3

Implementación y validación de resultados

3.1 Aplicación del modelo dinámico

Para el cálculo de la fuerza gravitacional F_{gxt} y la fuerza rodamiento F_{roll} (ecuación 1.4), se hace necesario el cálculo de ángulo de inclinación del terreno. Para esto se debe emplear la fórmula de Harvesine (ecuación 2) ya que los puntos de referencia están ubicados sobre la esfera terrestre por lo que si se desea conocer la distancia entre ambas posiciones se debe contemplar sus latitudes y las longitudes [33] .

$$d = 2r \tan^{-1} \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{lat2 - lat1}{2} \right) + \cos(lat1) \cos(lat2) \sin^2 \left(\frac{long2 - long1}{2} \right)} \right)$$

(2)

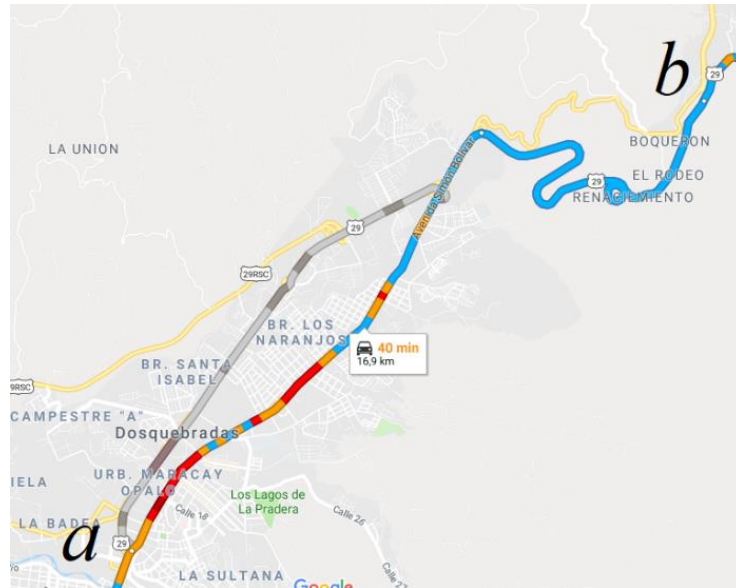


Figura 4. Puntos de referencia

Tomando los puntos de referencia de la figura 4 dentro de la ruta escogida, se puede calcular un diferencial de elevación con la distancia geodésica entre un punto a y un punto b pero teniendo en cuenta que el radio de la tierra es $r = 6371 \times 10^3$ [33]; estos puntos son obtenidos con googleMaps [7], usando las APIs elevación y distancematrix. Ver gráfico 5.

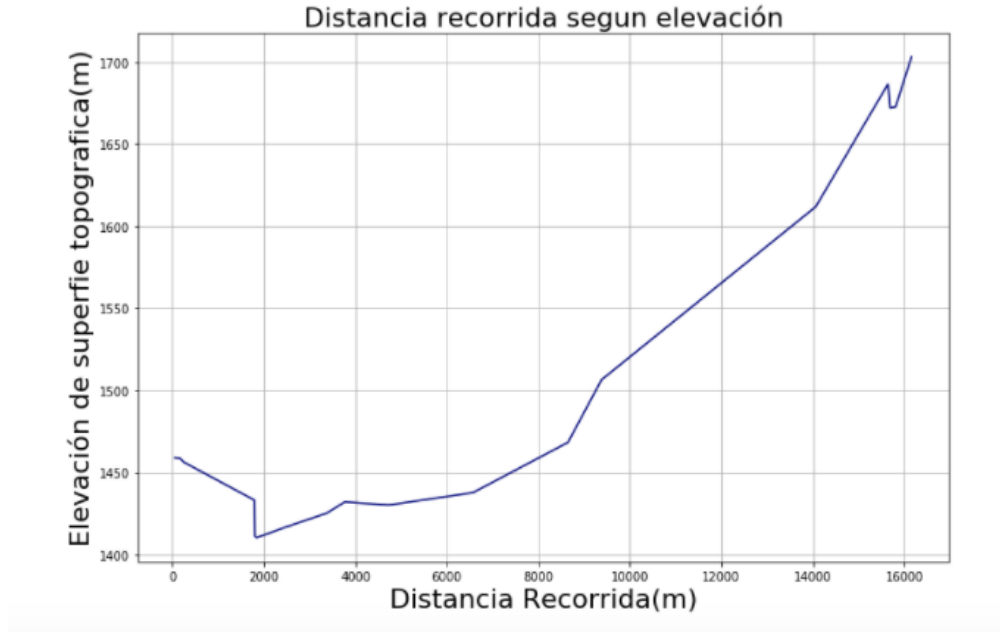


Gráfico 5. Perfil de elevación de ruta Pereira- Santa Rosa

Por lo tanto, α (ángulo de elevación) se obtiene con la ecuación 3.

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{(y_2 - y_1)}{d} \quad (3)$$

Donde y_2 es la elevación que entrega la API del punto b y y_1 es la elevación del punto a . d es la distancia entre el punto a y el punto b .

Dentro del cálculo de la fuerza de newton $ma = (m + J_{wh}/r^2)dv/dt$ uno de los mayores retos del modelamiento de la batería es calcular (dv/dt) , ya que no es posible aplicar el método de diferenciaciones finitas, debido a que el API distancematrix entrega unos puntos de parada que no son equidistantes, por lo que, en el momento de encontrar las distancias entre cada punto de la ruta, el Δd puede variar. Para lo anterior se sumaron los Δd y se halló un promedio de distancias.

$$v = \frac{d}{t} \quad (4)$$

Partiendo de la ecuación 4 y de que se tiene el tiempo que el VE se demora en recorrer cada tramo de la ruta, se pudo calcular (dv/dt) .

Reemplazando los datos de la Tabla 1 y las incógnitas de distancia, tiempo, velocidad y elevación en la ecuación (1.4), es posible hallar la fuerza de propulsión (Fd) del VE para posteriormente reemplazarla en la ecuación 5, donde se halla la potencia total consumida por la batería del vehículo teniendo en cuenta la velocidad.

$$P_{Total} = F_d V \quad (5)$$

Donde P_{Total} es la Potencia calculada por la fuerza de propulsión y V es la velocidad de cada tramo [34].

Para calcular la autonomía de la batería es necesario emplear la ecuación de la energía entendida como la capacidad que tiene un cuerpo en realizar un trabajo. El trabajo desarrollado en unidad de tiempo es la potencia por lo que al integrar se puede obtener la energía y obtener información del proceso de descarga de la batería [35].

$$E = \int P dt \quad (6)$$

Esta energía puede ser empleada mas adelante para determinar el efecto del vehículo eléctrico en la curva de carga.

3.2 Implementación del modelo

Con lo mencionado en el capítulo anterior se hace necesario implementar una simulación donde se pueda observar el paso a paso de la implementación de la ecuación 1.4 con los datos encontrados.

Los datos del vehículo se muestran en la tabla 1 con los que se encontrarán los resultados y se llegarán a las respectivas conclusiones.

m (Masa)	1685 kg
g (gravedad)	9.8 m/s ²
C_o (Coeficiente de Rodadura)	0.012
ρ (Densidad del aire)	1225 kg/m ³
C_d (Coeficiente aerodinámico)	0.29
A_F (Área frontal)	0.27 m ²
r (Radio de la rueda)	0.275
J_{wh} (Inercia de la rueda)	1.5 kg m ²
V_o (Velocidad del viento)	0 m/s

Tabla 1. Datos de propulsión de un vehículo eléctrico típico [36][37].

Se implementó la ruta desde la portería principal de la Universidad Tecnológica de Pereira hasta Santa Rosa de Cabal debido a que se podría observar mejor los resultados porque el perfil del terreno tiene una pendiente más elevada como se muestra en el gráfico 5.

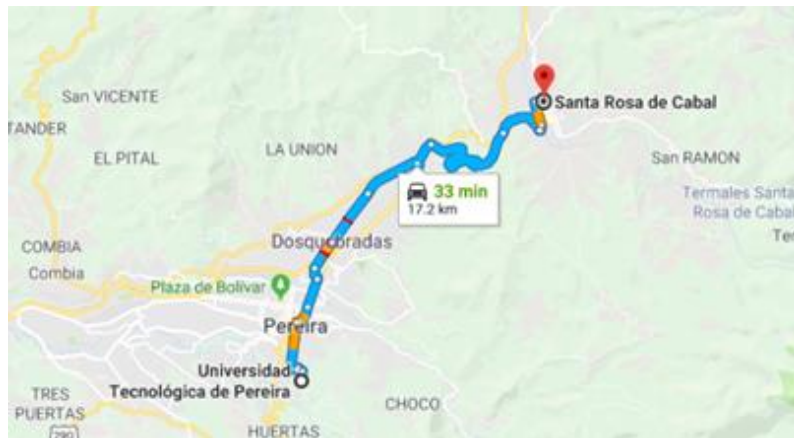


Figura 5. Vista de la ruta escogida en Google Maps de la ciudad de Pereira

En la figura 5 se puede apreciar la ruta escogida en google Maps de donde se obtuvieron las longitudes y latitudes dependiendo de la ubicación exacta de las referencias seleccionadas.

3.3 Resultados

Reemplazando en la simulación los datos de la tabla 1, los datos obtenidos con todo el análisis propuesto y las ecuaciones previamente desarrolladas (1.3 y 1.4), fue posible obtener la gráfica de la velocidad vs tiempo teniendo en cuenta que esta puede variar dependiendo del terreno y del tráfico que se presente en la vía, debido a que en horas pico la fluidez del tráfico es menor y el tiempo puede aumentar.

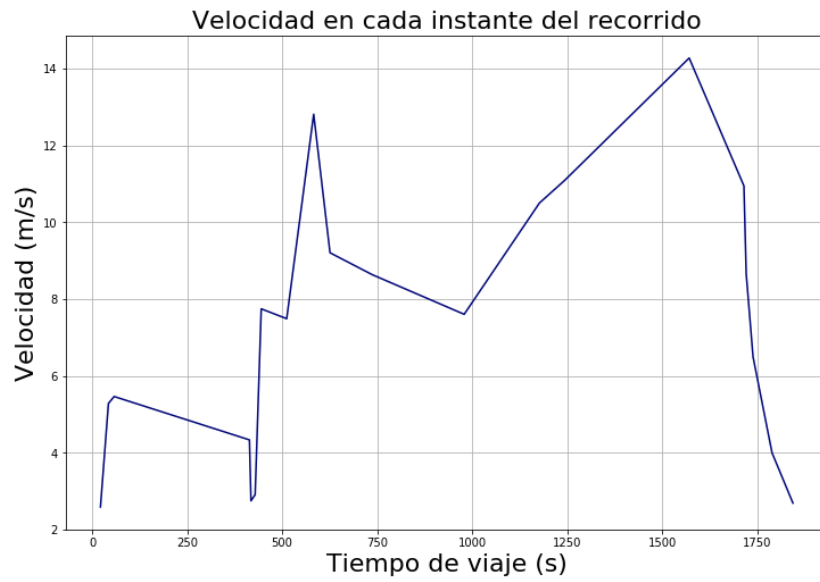


Gráfico 6. velocidad vs tiempo

Con la ecuación 6 es posible encontrar la energía consumida del VE como se muestra en el gráfico 7, donde se observa una relación directamente proporcional, dado que a medida que la inclinación de la pendiente es mayor, la batería necesita más energía debido a que las fuerzas que actúan sobre el VE son mayores.

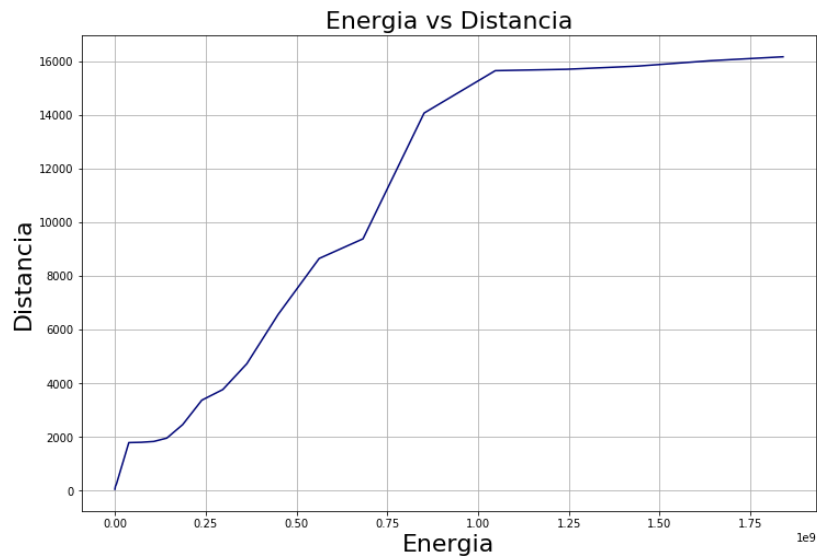


Gráfico 7. Energía vs distancia

Teniendo en cuenta que la batería del VE utilizado en promedio tiene una capacidad de 24 kW y una autonomía de 199 km [38], cuando se tiene una ruta sin elevación, de una forma

aproximada fue posible encontrar el gráfico 8, donde se parte de un estado de batería con autonomía 90 km y se llega a un autonomía de 60km

Sin embargo, la capacidad de la batería disminuye debido al tipo de ruta recorrida, ya que se tiene en cuenta un ángulo de elevación cuando se halla la fuerza de propulsión (1.4) y como ya se había mencionado anteriormente, Colombia es un país con topografía montañosa, por lo que la curva de carga del VE se modifica significativamente ante situaciones especiales, como es el caso de las horas pico, donde el flujo vehicular aumenta.

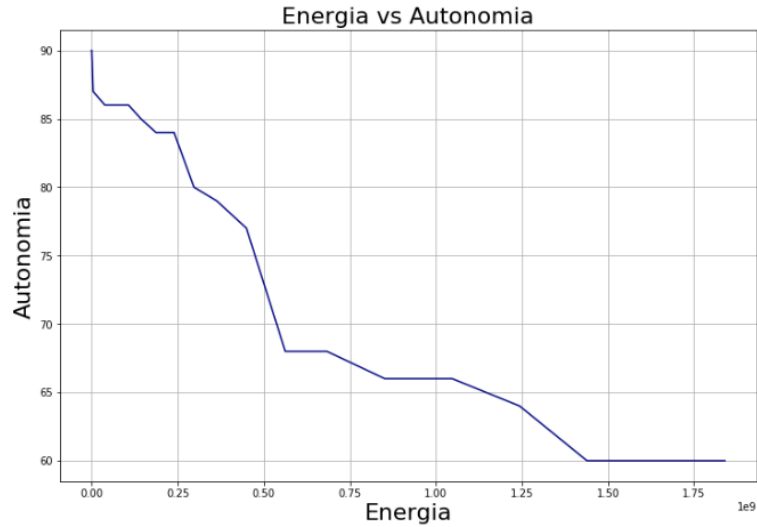


Gráfico 8. Energía vs autonomía

3.4 Uso del modelo

El modelo dinámico propuesto puede ser utilizado para simular y predecir la demanda de energía eléctrica basado en los datos del sistema de tránsito y en los tres modelos energéticos existentes, los cuales se clasifican en modelos de demanda, modelos de oferta y modelos del sistema [24]; para ello se espera usar un esquema como el de la figura 6, donde se parte de las APIs de Google Maps que permiten consultar los puntos de parada de un vehículo, la velocidad promedio, el origen y destino de una ruta, el perfil de elevación de la misma, además de la distancia y el tiempo del recorrido. Con estos datos es posible encontrar la fuerza de propulsión y posteriormente la energía, como ya se explicó en los capítulos anteriores, para obtener las gráficas necesarias para el análisis y las conclusiones apropiadas.

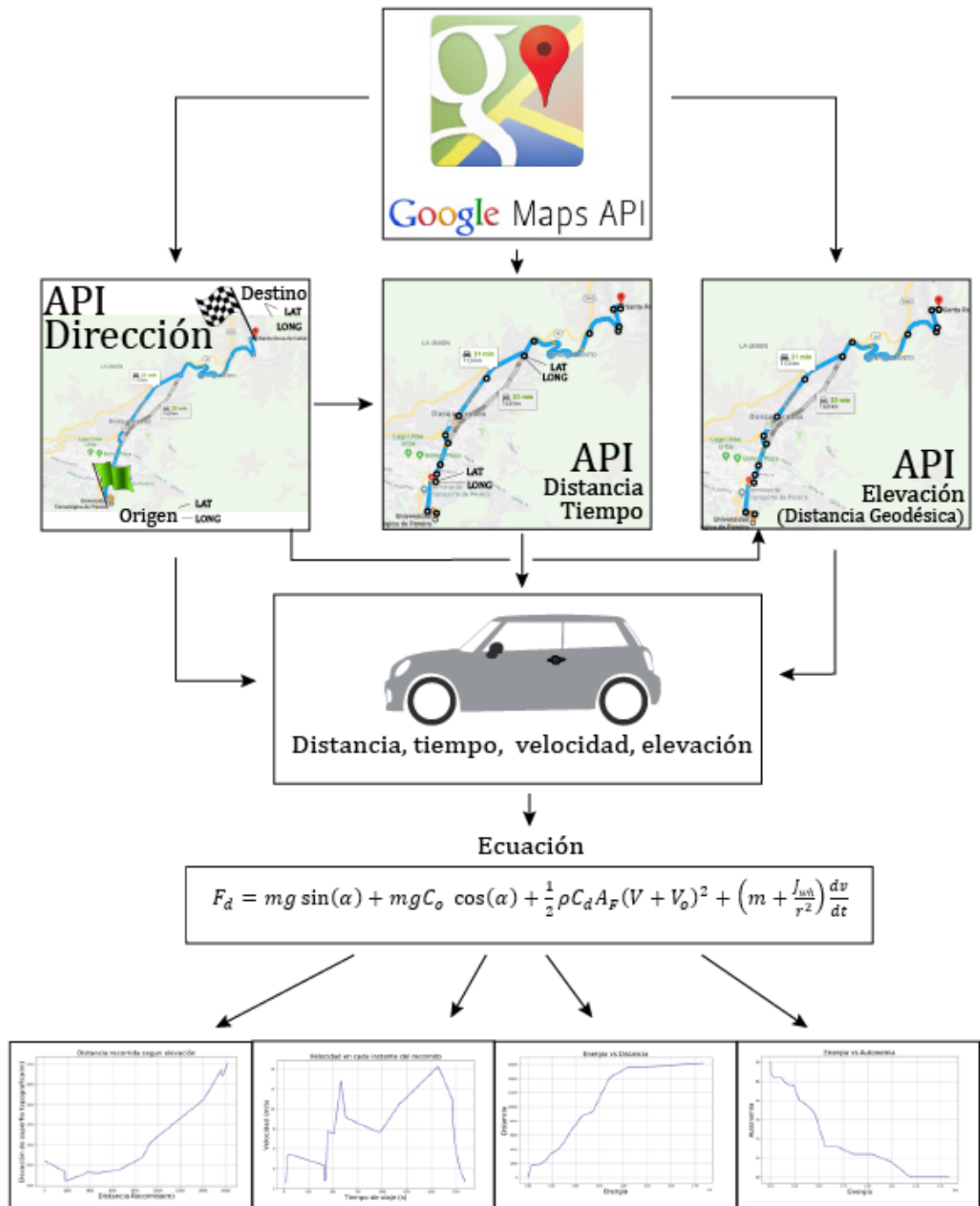


Figura 6. Mapa conceptual Modelo dinámico

Capítulo 4

Conclusiones

Este trabajo presenta una visión general del modelo dinámico de un VE, enmarcado en una ruta de la ciudad de Pereira- Santa Rosa, Colombia. En este trabajo se hace énfasis sobre el modelo matemático y la simulación para determinar el consumo energético de la batería.

Debido a la alta capacidad energética de la batería de iones de litio el carro empleado en el estudio, para recorrer la ruta de Pereira a Santa Rosa, se puede evidenciar una buena autonomía de la batería, sin embargo, para trayectos más largos se deja abierto el estudio debido a que el terreno puede variar y la eficiencia se vería afectada notablemente.

Los modelos analíticos son una solución sencilla para desarrollar los diferentes aspectos dinámicos del VE desde su peso, velocidad entre otras características para calcular los diferentes datos requeridos y relacionarlos en una ecuación sencilla que permita describir las propiedades de la batería.

Pereira, Manizales y Medellín son algunas de las ciudades más montañosas donde la batería VE puede verse afectada, es por ello la importancia de un estudio sobre estas rutas para la ubicación de electrolineras que optimicen la recarga de las baterías.

Entre mayor sea la pendiente de una ruta el vehículo eléctrico requiere de más fuerza de propulsión para su recorrido y por lo tanto la autonomía y la eficiencia de este disminuye.

Algunos vehículos eléctricos están diseñados para cargar sus baterías mientras están bajando pendientes y ayudar a que la autonomía se ha mucho mayor, en zonas como el eje cafetero que está rodeadas de tantas montañas, sería de gran utilidad realizar un estudio basado en el comportamiento de las baterías.

Se deja abierto el estudio para realizar los cálculos de una forma más exacta donde por medio de los resultados se pueda identificar el diseño de baterías más eficiente para ciudades como Pereira.

Bibliografía

- [1] J. F. A. M. Juan Carlos Aponte Gutiérrez, “Proyección de Demanda de Energía Eléctrica en Colombia,” *Unidad Planeación Min. Energética-UPME*, pp. 1–50, 2013.
- [2] O. P. Latinoamérica, “Movilidad eléctrica,” 2016.
- [3] D. A. J. R. Ronald M, Dell Patrick T Moseley, *Towards Sustainable Road Transport*, 1st ed. 2014.
- [4] J. A. P. L. Rodrigo Garcia-Valle, *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks*. 2012.
- [5] E. T. Jaynes and F. W. Cummings, “Battery Modeling Approaches and Management Techniques for Plug-in Hybrid Electric Vehicles,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 51, no. 1. pp. 89–109, 1963.
- [6] T. D. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. 1992.
- [7] Google, “Google Maps API.” [Online]. Available: <https://developers.google.com/maps/?hl=es>.
- [8] Y. Mu, J. Wu, N. Jenkins, H. Jia, and C. Wang, “A Spatial-Temporal model for grid impact analysis of plug-in electric vehicles,” *Appl. Energy*, vol. 114, pp. 456–465, 2014.
- [9] UPME, “Plan De Acción Indicativo De Eficiencia Energética 2017 - 2022,” p. 157, 2017.
- [10] “Pereira tendrá su primera electrolinera,” 2016.
- [11] V. E. Para, “UPME PROYECTA ENTRADA DE 400 MIL,” no. 10, 2017.
- [12] C. Andrea and P. García, “Programación Óptima para la Recarga de Vehículos Eléctricos Enchufables y su Impacto en las Redes Eléctricas Inteligentes Programación Óptima para la Recarga de Vehículos Eléctricos Enchufables y su Impacto en las Redes Eléctricas Inteligentes,” *Univ. Tecnológica Pereira. Programa Ing. Eléctrica*, p. 45, 2014.
- [13] C. Mi, M. A. Masrur, and D. W. Gao, “Modeling and Simulation of Electric and Hybrid Vehicles,” *Hybrid Electr. Veh.*, vol. 95, no. 4, pp. 363–384, 2011.
- [14] G. A. Giraldo Gutiérrez, “Estudio del impacto de los vehiculos eléctricos en las redes de distribución de energía eléctrica,” *Univ. Tecnológica Pereira. Programa Ing. Eléctrica*, p. 117, 2015.
- [15] E. de Pereira, “Energía de Pereira le apuesta a la movilidad sostenible,” 2016.
- [16] M. G. Ruíz, “Pasado, presente y futuro de vehiculos electricos,” *Univ. Tecnológica Pereira. Programa Ing. Eléctrica*, pp. 4–54, 2015.
- [17] A. Mendez Cuello, M. Velez Cely, and W. Monar Monar, “Diseño del Sistema de Freno Regenerativo de Automóviles Híbridos,” *Diseño del Sist. Freno Regen. Automóviles Híbridos*, vol. 37, no. 2, 2016.
- [18] ANDEMOS, “Taller con Medios de Comunicación,” 2017.
- [19] RIMAC, “c4a0b60a0484c74055d1a455a7f151f35cf7a73f @ www.rimac-automobili.com.” [Online]. Available: http://www.rimac-automobili.com/en/supercars/concept_s/.
- [20] Faraday, “FF 91.” [Online]. Available: <https://www.ff.com/us/ff->

91/design#performance.

- [21] TESLA, “Modelx.” [Online]. Available: <https://www.tesla.com/modelx>.
- [22] G. J. Hoolboom and B. Szabados, “Nonpolluting Automobiles,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 43, no. 4, pp. 1136–1144, 1994.
- [23] V. A. Shah and M. M. Lokhande, “Electric Vehicle Batteries ; A Selection based on PROMETHEE Method,” 2016.
- [24] D. W. Dees, V. S. Battaglia, and A. Bélanger, “Electrochemical modeling of lithium polymer batteries,” *J. Power Sources*, vol. 110, no. 2, pp. 310–320, 2002.
- [25] M. Thele, O. Bohlen, D. U. Sauer, and E. Karden, “Development of a voltage-behavior model for NiMH batteries using an impedance-based modeling concept,” *J. Power Sources*, vol. 175, no. 1, pp. 635–643, 2008.
- [26] B. M. Varghese, “State-of-Charge Estimation of Lithium-Ion Batteries Combining Current and Voltage Based Estimation,” vol. 2, no. 12, pp. 128–131, 2013.
- [27] E. T. Jaynes and F. W. Cummings, “System Identification and Estimation Framework for Pivotal Automotive Battery Management System Characteristics,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 51, no. 1, pp. 89–109, 1963.
- [28] E. T. Jaynes and F. W. Cummings, “An Analytical Model for Predicting the Remaining Battery Capacity of Lithium-Ion Batteries,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 51, no. 1, pp. 89–109, 1963.
- [29] K. Young, C. Wang, L. Y. Wang, and K. Strunz, *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks*. 2013.
- [30] J. G. M. James F. Manwell, “Lead acid battery storage model for hybrid energy systems,” vol. 50, no. 5, pp. 399–405, 1993.
- [31] E. T. Jaynes and F. W. Cummings, “Improving Battery Performance by Using Traffic Shaping Techniques,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 51, no. 1, pp. 89–109, 1963.
- [32] D. E. Pereira, “Ubicación óptima de estaciones de recarga de energía eléctrica para intercambio de baterías para vehículos eléctricos,” 2017.
- [33] J. Rocha-Hoyos, L. E. Tipanluisa, S. W. Reina, and C. R. Ayabaca, “Evaluación del sistema de tracción en un vehículo eléctrico biplaza de estructura tubular,” *Inf. Tecnol.*, vol. 28, no. 2, pp. 29–36, 2017.
- [34] R. P. Feynman, *The Feynman Lectures on Physics; Vol. II*, vol. 53, no. 9. 2013.
- [35] Z. Zhang, L. Wang, J. Zhang, and R. Ma, “Study on requirements for load emulation of the vehicle with an electric braking system,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 9545, no. c, pp. 1–15, 2017.
- [36] A. Fotouhi, D. J. Auger, K. Propp, and S. Longo, “Electric vehicle battery parameter identification and SOC observability analysis: NiMH and Li-S case studies,” *IET Power Electron.*, vol. 10, no. Pemd 2016, pp. 1289–1297, 2017.
- [37] Nissan, “Nissan Leaf, Zero Emission,” *E-catalog*, no. October, 2012, 2012.
- [38] R. O’Ryan, “Diseño de un Modelo de Proyección de Demanda Energética Global Nacional de Largo Plazo,” *Environ. Manag. Econ. Progr.*, 2008.